

0-791077

На правах рукописи



ПАРТС ЯАН АДЛЬФОВИЧ

**РАСПРЕДЕЛЁННЫЕ
МНОГОЧАСТОТНЫЕ ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНЫЕ ДАТЧИКИ
ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Казань – 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ» (КНИТУ-КАИ) на кафедре Радиоэлектроники и информационно-измерительной техники (РИИТ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Евдокимов Юрий Кириллович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Санткулов Владимир Гельманович,
Казанский национальный исследовательский
технический университет – КАИ, г. Казань

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000688412

доктор технических наук, профессор
Муравьев Виталий Васильевич,
Ижевский государственный технический
университет, г. Ижевск

Ведущая организация: Специальное конструкторско-технологическое
бюро электроники, приборостроения и
автоматики (СКТБ ЭлПА), г. Углич

Защита состоится 26 декабря 2011 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д212.079.04 при Казанском национальном исследовательском техническом университете имени А.Н. Туполева – КАИ по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д.31/7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте КНИТУ-КАИ и на сайте Министерства образования и науки Российской Федерации.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, на имя учёного секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан 25 ноября 2011 г.

Учёный секретарь диссертационного совета

Седов С.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Своевременность и значимость темы. Пьезорезонансные датчики (ПРД) используются для измерения широкого спектра физических величин (температуры, давления, усилия, состава газов и жидкостей и других) и характеризуются сравнительно высокой точностью: порог чувствительности ПРД может достигать миллионных долей от диапазона изменения измеряемой величины. Выходным параметром ПРД обычно является резонансная частота.

Развитие систем управления производственными процессами характеризуется неуклонным ростом числа контролируемых параметров, поэтому естественным этапом развития ПРД представляется переход к многочастотным ПРД (МПРД), в которых объём выходной измерительной информации увеличивается за счёт использования множества рабочих резонансов. При этом можно использовать пьезоэлементы, в которых возбуждается несколько мод колебаний, либо формировать МПРД искусственным соединением нескольких одночастотных ПРД. В обоих случаях предпочтительны схемы включения в измерительную цепь с минимальным числом соединений. Использование одной пары электродов для возбуждения колебаний на различных частотах упрощает подключение МПРД к вторичной измерительной аппаратуре, но приводит к возникновению ряда проблем принципиального характера. Так, получение автоколебаний в системе более чем двух связанных осцилляторов осложнено явлениями конкуренции и взаимной синхронизации мод, потенциальной неустойчивостью колебаний, проблемами с построением и исследованием математических моделей, обусловленными нелинейным характером взаимодействия колебаний. Вместе с тем, дальнейшее увеличение числа рабочих частот в двухполюсных МПРД представляет существенный практический интерес, позволяя создавать датчики, измеряющие одновременно несколько физических величин в точке или распределение полей различной физической природы (тепловых, механических, электромагнитных и т.п.).

Развиваемый в настоящей работе подход на основе разделения во времени возбуждения колебаний и съёма выходного сигнала МПРД приводит к сравнительно простым методическим, алгоритмическим, схемотехническим и конструктивным решениям и позволяет снять ряд ограничений, присущих многочастотным автоколебательным системам. Таким образом, работа имеет существенное научное и практическое значение для создания новых элементов и устройств систем управления.

Тема работы предложена профессором Евдокимовым Ю.К. и является продолжением развиваемого им направления распределённых датчиков.

Цель работы. Улучшение технических, эксплуатационных и технико-экономических характеристик элементов и устройств систем управления на основе пьезорезонансных датчиков, заключающееся в уменьшении числа и суммарной длины соединительных проводников при измерении множества пространственно распределённых физических величин, повышении информативности измерений за счёт одновременного использования множества

резонансов, увеличении максимального расстояния от объекта измерения до вторичной измерительной аппаратуры.

Научная задача. Развитие теории и практики двухполюсных многочастотных пьезорезонансных датчиков физических полей.

Для достижения цели работы решаются следующие задачи:

1. Разработка принципов построения распределённых элементов и устройств систем управления на основе пьезорезонансных датчиков.

2. Анализ режимов работы пьезорезонансных датчиков. Выбор и обоснование метода получения и обработки измерительной информации двухполюсных многочастотных пьезорезонансных датчиков.

3. Разработка и исследование методов цифровой обработки измерительного сигнала многочастотного пьезорезонансного датчика.

4. Анализ факторов, влияющих на погрешность и оценка погрешности измерений на основе МПРД. Определение погрешности измерений.

5. Экспериментальные исследования свойств резонаторов, элементов измерительной цепи, методов обработки сигнала.

6. Разработка и реализация распределённых пьезорезонансных датчиков физических полей, типовых схем включения в измерительную цепь, схем вторичной измерительной аппаратуры.

Методы исследований. В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследований из областей математической статистики, интегральных преобразований, теории комплексного переменного, линейной алгебры, теории колебаний, теории линейных электрических цепей, цифровой обработки сигналов, в том числе методы оценивания параметров, численные методы моделирования.

Новизна

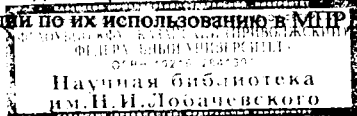
1. Предложен способ измерения пространственного распределения физических величин на основе пьезорезонансных датчиков, отличающийся тем что пьезорезонансные датчики соединены параллельно. Новизна способа подтверждена патентами на изобретение [4 – 6].

2. Предложены методы и алгоритмы получения и обработки измерительной информации двухполюсных МПРД, отличающиеся тем что в них решены проблемы устойчивости одновременных колебаний на множестве частот и влияния параллельной ёмкости соединительного кабеля.

3. Предложены и исследованы методы оценивания параметров модели сигнала МПРД на основе обработки БПФ, отличающиеся высокой вычислительной эффективностью и дающие несмещённую оценку частоты и коэффициента затухания.

4. Получены аналитические выражения для расчёта нижних границ дисперсии оценок комплексной частоты, позволяющие упростить анализ погрешности. Определены предел и порог разрешения. Получены числовые оценки погрешности аппаратуры, методов обработки измерительного сигнала.

5. Получены экспериментальные данные о свойствах камертонных пьезорезонаторов и методов оценивания параметров сигнала, позволяющие выработать рекомендации по их использованию в МПРД.



6. Разработаны и реализованы распределённые МПРД температуры, урвной раздела сред [10 – 13]. Новизна устройств для измерения физических полей на основе МПРД подтверждена патентами на изобретение [4 – 6]. Разработанные устройства использованы в системах управления [10].

Практическая ценность. Положительный эффект от использования двухполюсных МПРД заключается в уменьшении числа и суммарной длины соединительных проводников, упрощении соединения датчиков и вторичной измерительной аппаратуры и, в конечном итоге, уменьшении стоимости измерительного канала. В работе даны практические рекомендации по использованию МПРД в промышленных и лабораторных приложениях, указаны пути по дальнейшему совершенствованию МПРД и увеличению точности измерений. Предложенные в работе методы оценивания параметров измерительного сигнала могут быть использованы в других областях измерительной техники (например, при анализе вибраций, измерении скорости множества объектов по отражённой волне, определении направления приёма, обработке сигнала ядерного магнитного резонанса, анализе спектра сигналов).

Реализация результатов. В рамках НИР и ОКР, проводимых КНИТУ-КАИ, разработаны и реализованы МПРД для измерения температурного поля в составе АСУТП изготовления лопастей вертолётa [10], измерения уровня раздела сред газ-нефть-вода в горизонтальных нефтесборывающих скважинах [12], измерения наклона скважинного прибора (ёмкостный датчик). Предложен проект системы для измерения поля температур в подогреваемых горизонтальных нефтяных скважинах для контроля процесса разработки битумных месторождений. Изобретения внедрены в ОАО «Казанский вертолётный завод» (Казань), ООО «ТНГ-Групп» (Бугульма).

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: 14-й научно-технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления (Датчик-2002)» (Москва, 2002), международной научно-практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments» (Москва, 2003), международной научно-практической конференции «Авиакосмические технологии и оборудование» (Казань, 2006), всероссийской научной конференции «Информационные технологии в науке, образовании и производстве» (Казань, 2007), казанском научном семинаре «Методы моделирования» (Казань, 2008), юбилейной республиканской научно-технической конференции «Нигматуллинские чтения» (Казань, 2008), научных семинарах кафедры РИИТ КНИТУ-КАИ (Казань, 2001 – 2011).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах ВАК, 3 статьи в других изданиях, 3 патента РФ на изобретения, 4 тезиса докладов.

На защиту выносятся:

1. Способ измерения пространственно распределённых физических величин на основе параллельно соединённых пьезорезонансных датчиков.

2. Метод получения и обработки измерительной информации двухполосных МПРД.

3. Новые методы оценивания параметров модели сигнала МПРД.

4. Выражения для определения нижних границ погрешности и предела разрешения МПРД.

5. Результаты экспериментальных исследований свойств резонаторов, элементов измерительной цепи, методов обработки сигнала.

6. Многочастотные пьезорезонансные датчики физических полей, типовые схемы включения в измерительную цепь и обработки измерительной информации МПРД.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложений. Объем основного текста составляет 241 страницу, включая 187 формул, 63 рисунка, 51 таблицу. Библиографический список включает 297 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, определены цель и задачи работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 «Объект исследования» определено понятие многочастотного пьезорезонансного датчика (МПРД), кратко рассмотрены принцип действия, область применения, измерительные возможности, конкурентные преимущества МПРД, состояние предметной области, приведена классификация пьезоэлектрических устройств, рассмотрены способы построения, разновидности и проблематика МПРД, введены ограничения на область исследования.

МПРД определён как пьезоэлектрический измерительный преобразователь, работающий в области резонансных частот, в котором рабочими (используемыми) являются одновременно несколько резонансов [1]. Это позволило при прочих равных условиях на один-два порядка увеличить информационную ёмкость по сравнению с традиционными одночастотными пьезорезонансными датчиками (ПРД).

Принцип действия многочастотного пьезорезонансного датчика (МПРД) заключается в изменении частот множества рабочих резонансов под воздействием множества измеряемых физических величин (рис.1). Для передачи информации о множестве измеряемых величин по общему каналу связи используется его разделение по частоте. Основная измерительная задача состоит в получении измерительного сигнала, содержащего информацию о множестве измеряемых величин, и в обработке этого сигнала.

Частота f_k каждого k -го резонатора в цепочке связана со своей измеряемой величиной θ_k . Зависимость $\theta_k(f_k)$ известна. Диапазоны изменения частот f_k не перекрываются. Цикл измерения включает

определение амплитудно-частотной характеристики МПРД, оценку резонансных частот f_k и восстановление значений измеряемых величин θ_k .

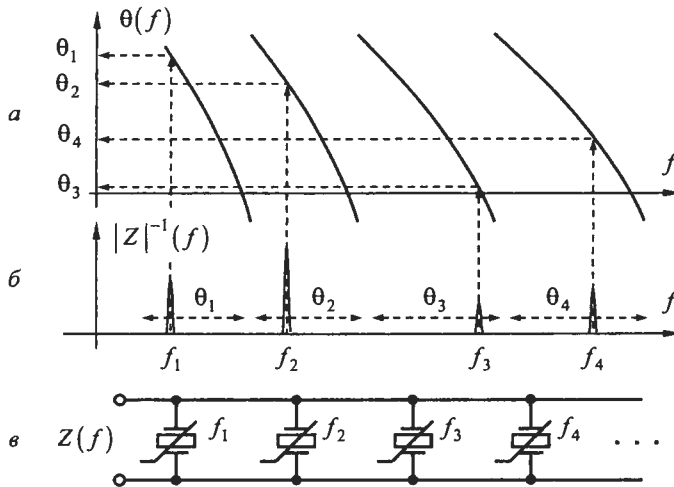


Рис.1. К принципу действия МПРД: а – характеристика преобразования; б – амплитудно-частотная характеристика (спектр); в – схема соединений

В предлагаемой краткой классификации (рис.2) пьезоэлектрические устройства разделены по следующим признакам: 1) по виду пьезоэффекта, 2) по назначению резонаторов, 3) по виду измеряемой физической величины, 4) по режиму возбуждения колебаний и съёма измерительного сигнала, 5, 6) по способу стабилизации и управления частоты автогенераторов на резонаторах объёмных (ОАВ) и поверхностных (ПАВ) акустических волнах, 7) по типу акустических волн, 8) по диапазону рабочих частот, 9) по числу выводов, 10) по числу рабочих частот, 11) по числу пьезоэлементов и 12) их распределению в пространстве.

Характерные особенности МПРД:

(М) общий измерительный сигнал для множества частот колебаний

(П) пьезоэлектрик в качестве чувствительного элемента

(Р) использование резонансных свойств пьезоэлемента

(Д) измерение физических величин

Область исследования диссертационной работы ограничена главным образом двухполосными квазираспределёнными МПРД температуры на основе низкочастотных пьезорезонаторов камертонного типа.

В главе 2 «Получение и обработка измерительного сигнала» рассмотрена задача возбуждения колебаний и обработки выходного сигнала МПРД.

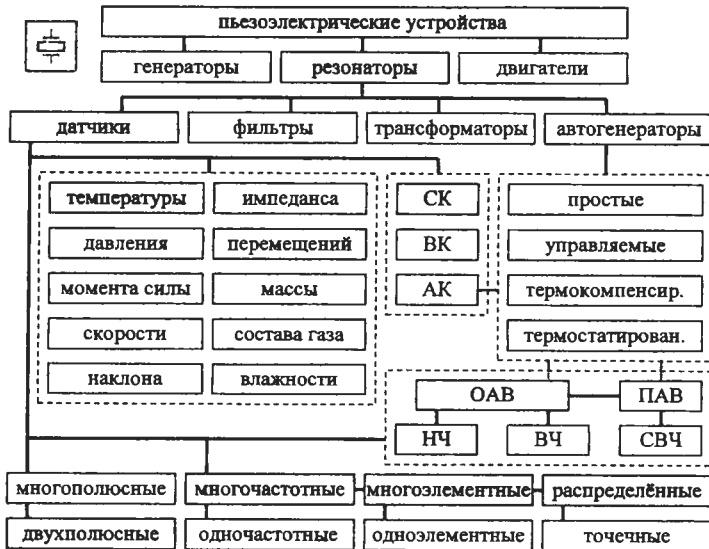


Рис.2. Краткая классификация пьезоэлектрических устройств. Серым цветом выделены группы устройств, соответствующие предмету и основной области исследования работы. Использованы обозначения: СК – свободные колебания, ВК – вынужденные колебания, АК – автоколебания, НЧ – низкие частоты (до 1 МГц), ВЧ – высокие частоты (до 100 МГц), СВЧ – сверхвысокие частоты (более 100 МГц)

В предлагаемом подходе эта задача решена разделением во времени процессов возбуждения колебаний и съёма измерительного сигнала. Это позволило решить проблемы устойчивости колебаний и компенсации сигнала возбуждения. Дополнительно удалось существенно увеличить максимальную длину соединительного кабеля.

Возбуждение предложено выполнять в режиме вынужденных колебаний с использованием широкополосного частотно-модулированного сигнала, что позволило снять проблему устойчивости колебаний и обеспечить широкие возможности по изменению спектра возбуждения. Для компенсации затухания предложено использовать сигнал с экспоненциальной частотной модуляцией.

Съём измерительного сигнала предложено выполнить в режиме свободных колебаний, что позволило одновременно определять параметры множества резонансов (как частоту, так и коэффициент затухания) и уменьшить влияние ёмкости кабеля на результат измерений. Цикл измерения включает последовательное выполнение операций возбуждения колебаний, получения измерительного сигнала, (опционально) демпфирования колебаний, обработки измерительного сигнала (определения резонансных частот и измеряемых физических величин). Частоты всех рабочих резонансов МПРД определяются одновременно в одном цикле измерения.

Рассмотрены задачи аналоговой и цифровой обработки, введены ограничения на модель информационного сигнала, приведена классификация методов оценивания параметров модели, рассмотрены их характеристики, решён ряд прикладных вопросов, связанных с выбором аппаратуры и алгоритмов цифровой обработки сигналов.

При обработке измерительного сигнала предполагается, что известны его реализация и модель, и задача обработки сводится к определению неизвестных параметров модели. Выходной сигнал МПРД в режиме свободных колебаний в первом приближении описывается суммой множества затухающих синусоид или комплексных экспонент:

$$x(t) = \sum_{k=1}^K x_k(t) = \sum_{k=1}^K a_k e^{j2\pi s_k t} = \sum_{k=1}^K |a_k| e^{j\varphi_k} e^{(-\alpha_k + j2\pi f_k)t}, \quad (1)$$

где t – время, a_k и s_k – комплексные амплитуда и частота k -го компонента $x_k(t)$ (тона), φ_k – фаза, α_k – коэффициент затухания, f_k – частота, $\omega_k = 2\pi f_k$ – круговая частота, K – число компонентов модели (резонансов МПРД).

Основной задачей обработки сигнала МПРД является определение значений частоты и коэффициента затухания рабочих мод колебаний. С учётом особенностей выходного сигнала МПРД (малое затухание, большое число компонентов) рекомендовано использовать для решения этой задачи методы на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ), несколько уступающие методам высокого разрешения по достижимой точности и способности различать колебания с близкими частотами, но превосходящие их по вычислительной эффективности, устойчивости, способности выделять колебания при малых отношениях сигнал-шум [7].

Основные операции получения оценки частоты \hat{f} (повторяются для всех рабочих резонансов): 1. Определяется дискретное преобразование Фурье (ДПФ) $Y(f)$ реализации сигнала $y(t)$ с учётом наложения временного окна $g(t)$. 2. Определяется частота локального максимума ДПФ $f_0 = \arg \max_f |Y(f)|$. 3. По значениям A_n нескольких опорных точек ДПФ f_n в окрестности f_0 определяется поправка частоты δ и искомое значение $\hat{f} = f_0 + \delta$ (рис.3).

В настоящей работе область применения методов на основе БПФ расширена на модель затухающих синусоид за счёт обработки комплексного спектра, при этом вместо δ введена комплексная поправка частоты $\Delta = \delta + j\alpha/(2\pi)$. Расчётные соотношения для некоторых методов оценивания приведены в табл.1.

В работе определено новое семейство методов оценивания CUBE (conditionally un-biased estimator), дающих несмещённую оценку параметров (при условии, что влияние боковых лепестков спектра устранено). В обозначении конкретного метода CUBE-ABC/DE указывается число опорных точек A , используемая область спектра B , коэффициент дополнения нулями C , способ получения расчётного соотношения D , порядок окна F . Известные методы оценивания (CUBE-2A/F) частично входят в семейство методов CUBE.

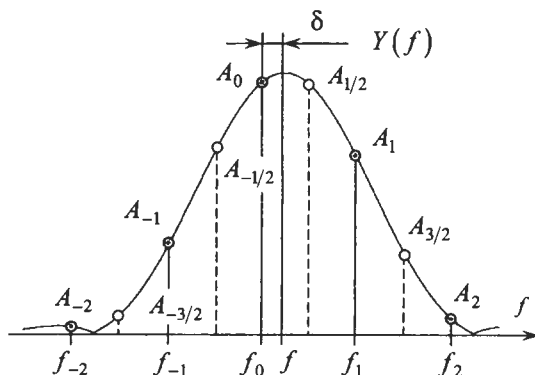


Рис.3. Определение оценки частоты гармонического сигнала по нескольким точкам ДПФ. Сплошной линией показан модуль преобразования Фурье (ПФ) сигнала, ограниченного временным окном (в данном случае – комплексной синусоиды с окном Ханна). Кружками обозначены точки ДПФ. Незакрашенными кружками обозначены точки ДПФ, полученные методом дополнения нулями (при увеличении длины реализации в два раза)

Для уменьшения влияния боковых лепестков использованы окна данных $g(t) = [\sin(\pi t)]^{2W}$, где W – порядок окна. Использование других семейств окон данных затрудняет получение несмещённой оценки.

Таблица 1

Расчётные выражения для несмещённых оценок частоты на основе БПФ		
Метод	Ограничения	Расчетные соотношения
CUBE-2C/F		$\Delta = \frac{1}{2} + \left(W + \frac{1}{2}\right) \frac{x+1}{x-1}; \quad x = \frac{A_1}{A_0}$
CUBE-3C/F		$\Delta = (W+1) \frac{x-y}{x+y-2}; \quad x = \frac{A_1}{A_0}; \quad y = \frac{A_{-1}}{A_0}$
CUBE-3C/S		$\Delta = \frac{x-y}{2(xy-1)}; \quad x = \frac{A_1}{A_0}; \quad y = \frac{A_{-1}}{A_0}$
CUBE-2A/F	$\alpha = 0, \quad -W \leq \delta \leq 1+W$	$\delta = \frac{(W+1)x-W}{x+1} = \frac{1}{2} + \left(W + \frac{1}{2}\right) \frac{x-1}{x+1}; \quad x = \left \frac{A_1}{A_0} \right $
CUBE-4P2	$\alpha \geq 0$	$\delta = \frac{1}{4} + \frac{(W+1/2)(x-y)}{(4W+1) + (x+y) - (4W+3)xy}; \quad x = \frac{ A_1 ^2}{ A_0 ^2}$ $\alpha = 2\pi \left \frac{(\delta-W-1)^2 x - (\delta+W)^2}{1-x} \right ^{1/2}; \quad y = \frac{ A_{-1/2} ^2}{ A_{1/2} ^2}$

В методах CUBE могут использоваться операции дополнения нулями (CUBE-4P2), обнуления части реализации, введения экспоненциального окна. Выбор числа опорных точек БПФ и способа комбинирования их значений в общем случае изменяет свойства оценки. Установлено, что для получения несмещённых оценок по БПФ могут быть использованы как отсчёты комплексного спектра A_n (CUBE-C), так и (при определённых ограничениях на область значений) амплитудного спектра $|A_n|$ (CUBE-A), спектра мощности $|A_n|^2$ (CUBE-P), фазового спектра $\arg A_n$ (CUBE-H), вещественной $\operatorname{Re} A_n$ (CUBE-R) или мнимой $\operatorname{Im} A_n$ (CUBE-I) части спектра.

В главе 3 «Погрешности измерений» рассмотрены элементы измерительной цепи и их влияние на результат измерений, указаны основные влияющие факторы окружающей среды, приведены способы их учёта и компенсации. Основное внимание уделено факторам, действующим непосредственно на резонатор и приводящим к возникновению систематических погрешностей измерений. Основными источниками погрешности (в порядке уменьшения степени влияния) являются температура, время, механические воздействия (удары, вибрации, ускорения).

Рассмотрены способы описания и виды погрешности, модели сигнала и помех, математический аппарат теории погрешностей. Наряду с точечными характеристиками качества оценок (смещение и с.к.о.) использованы понятия нижней границы Крамера-Рао, статистической эффективности, порогового эффекта, предела и порога разрешения, кратковременной и долговременной нестабильности (с учётом воздействия частотно-модулированных шумов).

Типичный вид зависимости погрешности оценки частоты ε_f одиночной синусоиды от отношения сигнал-шум (с/ш) при воздействии аддитивного белого шума показан на рис.4.

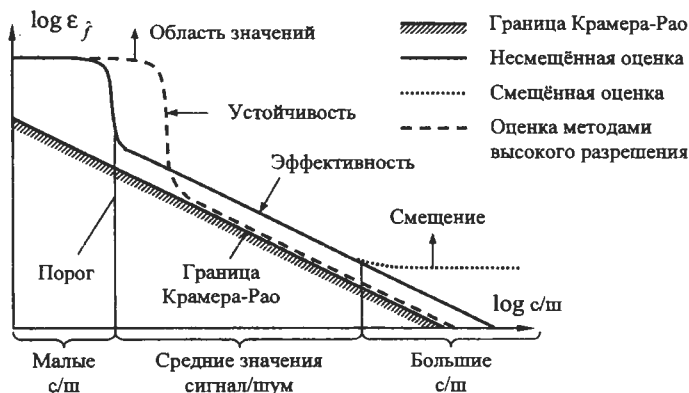


Рис.4. Зависимость среднеквадратической погрешности от отношения сигнал-шум

На графике можно выделить три характерных участка: при больших значениях с/ш погрешность ограничивается смещением оценки, при средних – эффективностью оценки, при малых значениях с/ш наблюдается резкое увеличение погрешности (так называемый пороговый эффект), связанное с ростом вероятности ошибок детектирования [8].

Рассмотрены вопросы определения теоретических границ погрешности и разрешающей способности безотносительно к методам оценивания параметров и влиянию измерительной аппаратуры. Получены новые аналитические выражения для расчёта нижних границ Крамера-Рао дисперсии оценок комплексной частоты и амплитуды для одной и двух затухающих комплексных экспонент при ограниченной и неограниченной реализации. В частности, для одной комплексной экспоненты при конечной длине реализации N средний квадрат погрешности оценки коэффициента затухания и круговой частоты

$$\varepsilon_{\hat{\alpha}, \hat{\omega}}^2 \geq \frac{\sigma^2}{|a|^2} \frac{(1 - e^{-2\alpha})^3}{e^{-2\alpha}} \frac{e^{N\alpha}}{2N \operatorname{sh}(\alpha)} \left(\frac{\operatorname{sh}(N\alpha)}{N \operatorname{sh}(\alpha)} - \frac{N \operatorname{sh}(\alpha)}{\operatorname{sh}(N\alpha)} \right)^{-1}, \quad (2)$$

в случае двух комплексных экспонент при неограниченной длине реализации

$$\varepsilon_{\hat{\alpha}_1, \hat{\omega}_1} \geq \frac{\sigma}{|a_1|} \frac{(1 - e^{-2\alpha_1})^{3/2}}{e^{-\alpha_1}} \frac{\operatorname{ch}(\alpha_1 + \alpha_2) - \cos(\omega_1 - \omega_2)}{\operatorname{ch}(\alpha_1 - \alpha_2) - \cos(\omega_1 - \omega_2)}. \quad (3)$$

Здесь σ – с.к.о. аддитивного белого шума, величины α , ω , $\varepsilon_{\hat{\alpha}, \hat{\omega}}$ нормированы по частоте дискретизации. Полученные выражения позволяют выбрать оптимальную длительность реализации и определить предел разрешения по частоте при заданном затухании [2]. Установлено, что порогом разрешения по частоте является величина, имеющая порядок коэффициента затухания $\omega_{\Delta} \approx 2\alpha$; дальнейшее сближение полюсов приводит к росту с.к.о. оценки частоты обратно пропорционально квадрату расстояния между полюсами и быстрому достижению предела разрешения $\omega_{\Delta}^3 \approx \sigma |a|^{-1} (2\alpha)^{7/2}$.

Для описания нестабильности частоты во временной области принято использовать так называемое двухточечное отклонение, или отклонение Аллана

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2} E \left[(y_{k+1} - y_k)^2 \right]}, \quad y_k = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k + \tau} y(t) dt, \quad y(t) = \frac{f(t) - f_0}{f_0}, \quad (4)$$

где $y(t)$ – относительные флуктуации частоты, f_0 – частота несущего колебания, τ – время усреднения, E – математическое ожидание. Понятие отклонения Аллана позволяет обойти трудности, возникающие при использовании стандартного отклонения при описании нестационарных шумовых процессов.

На рис.5 и рис.6 показаны сводные графики кратковременной и долговременной нестабильности σ_y рабочих частот МПРД. Жирной линией со штриховкой показана нижняя граница нестабильности или погрешности измерения типового МПРД (100 низкочастотных резонаторов РК-206 с

частотой 30...40 кГц и типовой добротностью $4 \cdot 10^4$, малое старение, ёмкостная нагрузка менее 10 нФ, минимально достижимый уровень шума и нелинейных искажений, пренебрежимо малое влияние окружающей среды). Пунктирными линиями обозначены границы нестабильности, полученные при различных уровнях аддитивного шума, величинах старения и внешних воздействиях. Графики $\sigma_y(\tau)$ включают следующие характерные участки: $\sigma_y \sim \tau^{-3/2}$ – определяется отношением сигнал-шум, $\sigma_y \sim \tau^{-1/2}$ – связан с конечным значением добротности резонатора или усреднением по нескольким наблюдениям, $\sigma_y \sim \tau^0$ – связан с квантовыми эффектами внутри резонатора или сдвигом частоты, $\sigma_y \sim \tau^1$ – определяется процессами старения резонатора.

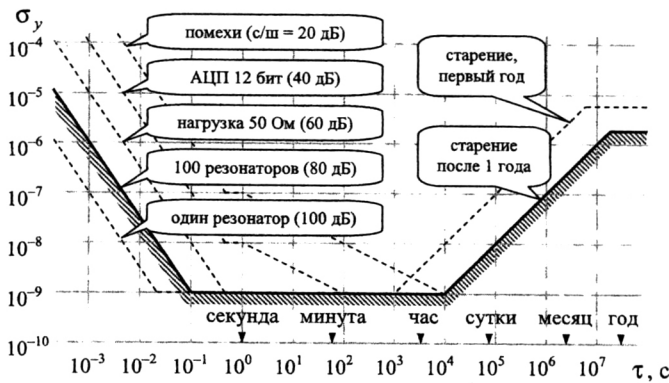


Рис.5. Кратковременная и долговременная нестабильность МПРД при различном уровне шума и старении, предел стабильности, порядки величин (жирной линией обозначена нижняя граница нестабильности или погрешности измерения типового МПРД)

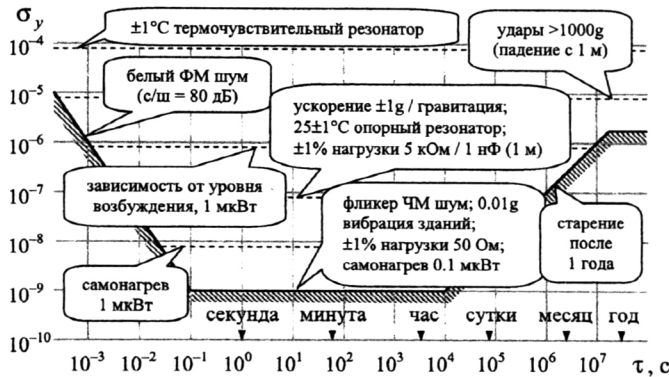


Рис.6. Влияние различных факторов на нестабильность МПРД, порядки величин

Теоретически воздействие влияющих факторов можно учесть, используя дополнительную измерительную аппаратуру, на практике возможности компенсации внешних воздействий ограничены, поэтому приведённые сведения могут использоваться для грубой оценки погрешности измерений при заданной величине воздействий.

В главе 4 «Экспериментальные данные» приведены результаты натурных исследований свойств пьезорезонаторов и численного моделирования предложенных методов оценивания параметров информационного сигнала.

Исследованы спектральные характеристики низкочастотных кварцевых резонаторов и влияние внешних воздействий (тепловых, механических, электромагнитных). Определён спектр собственных частот резонаторов, включая динамические параметры обертонов, причём полученные оценки несколько отличаются от теоретических. Например, основной обертоновый ряд ($\times 1$: $\times 5.9$: $\times 15$: $\times 27$) существенно отличается от теоретического ряда для «идеального» камертона ($\times 1$: $\times 6.27$: $\times 17.5$: $\times 34.4$). Частота первого обертона низкочастотных камертонных резонаторов может составлять около $\times 5 \dots \times 6$ частоты основного тона. Обнаружены неисправные резонаторы с частотой первого обертона около $\times 2.4$, что сужает доступный диапазон рабочих частот МПРД. Определены температурные коэффициенты параметров резонаторов.

Определены метрологические характеристики новых методов оценивания на основе БПФ. Установлено, например, что статистическая эффективность методов CUBE достигает 0.6 (–4.4 дБ) при использовании окна Ханна ($W=1$). Проведён сравнительный анализ методов высокого разрешения и методов на основе БПФ на примере типовых представителей этих методов. Определены погрешности методов оценивания при различных воздействиях (шума, соседних частот, скачков амплитуды, дрейфа частоты, задержки сигнала).

В главе 5 «Измерительная аппаратура» рассмотрены различные прикладные вопросы, связанные с разработкой измерительной аппаратуры, адаптацией МПРД под конкретные измерительные задачи, настройкой и обслуживанием измерительной системы на основе МПРД. Приведены примеры приложений, даны рекомендации по выбору элементов измерительной цепи, рассмотрены перспективы развития МПРД.

Базовая схема включения МПРД в измерительную цепь приведена на рис.7.

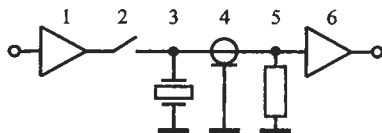


Рис.7. Базовая схема включения МПРД в измерительную цепь: 1 – буферный усилитель сигнала возбуждения, 2 – ключ, 3 – МПРД, 4 – экранированный соединительный кабель, 5 – нагрузка, 6 – усилитель измерительного сигнала

Типовая схема получения и обработки измерительного сигнала МПРД приведена на рис.8. В схеме можно выделить первичные измерительные преобразователи (1), измерительный контур (1-3), измерительную цепь (1-7), цепь возбуждения колебаний (7-10, 1-3).

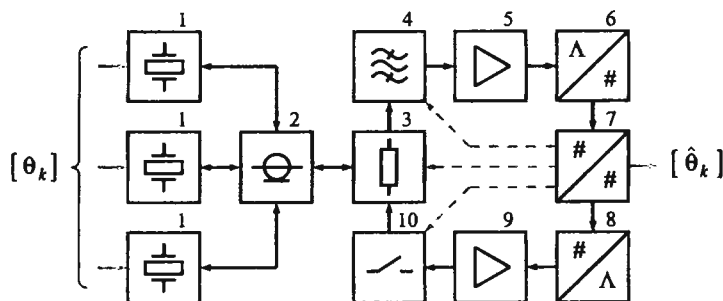


Рис.8. Типовая схема получения и обработки измерительного сигнала МПРД в режиме свободных колебаний: 1 – ПРД, 2 – соединительный кабель, 3 – нагрузка (токоосъемное сопротивление), 4 – полосовой фильтр, 5 – входной усилитель, 6 – АЦП, 7 – сигнальный процессор, 8 – ЦАП, 9 – выходной усилитель, 10 – аналоговый ключ

Максимальное число резонаторов в распределённом МПРД в первом приближении определяется отношением доступной полосы частот и диапазона рабочих частот одного резонанса. Доступная полоса частот ограничена полосой пропускания соединительного кабеля и спектром собственных частот резонаторов. Рекомендовано использовать низкочастотные камертонные пьезорезонаторы, характеризующиеся чистым спектром в широкой полосе частот. Диапазон рабочих частот резонатора зависит от измеряемой величины, диапазона её изменения и чувствительности пьезорезонатора. Потенциальные возможности МПРД температуры отражены в табл.2 (см. также рис.5 и рис.6).

Для соединения резонаторов рекомендовано использовать коаксиальный кабель. Экспериментально подтверждена работоспособность МПРД при длине соединительного кабеля 100 м.

Таблица 2

Параметры МПРД температуры			
тип резонатора (погрешность)	диапазон температур, °C	полоса частот резонатора, %	число резонаторов в полосе 1×...5×
опорный РКОВ-206В (±1°C)	+50...+150	0.05	3000
	+50...+250	0.12	1400
	+50...+400	0.5	320
термочувствительный РКТВ-206В (±0.1°C)	0...+100	0.65	240
	0...+200	1.5	100
	-269...+400	4.5	35

Погрешность МПРД температуры на основе низкочастотных камертонных пьезорезонаторов составляет $\pm 0.1^\circ\text{C}$ и ограничена величиной старения. При использовании периодических калибровок и устранении внешних воздействий погрешность может быть снижена до величин порядка 10^{-5}°C (см. рис.6).

Проведено сравнение МПРД температуры с термоэлектрическими преобразователями (ТП) и термометрами сопротивления (ТС) [9]. В целом, в промышленных приложениях МПРД, ТП и ТС имеют сравнимые диапазоны температур (при использовании резонаторов из перспективных пьезоматериалов, например, лангасита), показатель тепловой инерции, воспроизводимость результатов измерений, и характеризуются сравнительно невысокой стоимостью измерительной аппаратуры. МПРД несколько уступают ТП и ТС по механической прочности и надёжности, превосходя их по стабильности и достижимой точности измерений. Преимуществом МПРД является использование двухпроводной соединительной линии.

Разработаны и реализованы распределённые МПРД температуры, уровней раздела сред [10 – 13]. Разработанные МПРД внедрены в системы управления процессами изготовления лопастей вертолёт, измерения температурного поля водородного топливного элемента (рис.9) и ствола нефтяной скважины, идентификации фаз флюидов в горизонтальных нефтяных скважинах (рис.10).

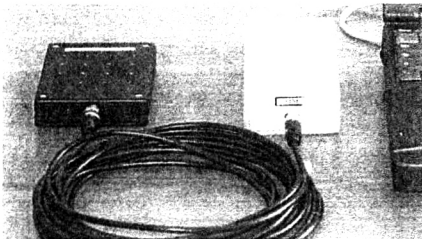


Рис.9. Устройство для измерения поля температуры в мембранно-электродном блоке водородного топливного элемента на МПРД (лаборатория UMR CNRS №6608 университета г. Пуатье, Франция, 2003). Включает 16 пьезорезонансных датчиков

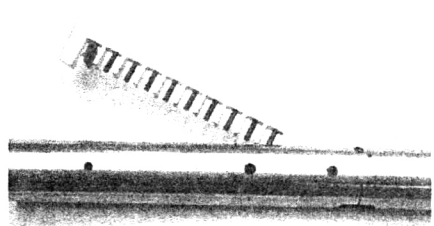


Рис.10. Измерительная часть скважинного прибора для определения уровней раздела фаз газ-нефть-вода на МПРД. Включает 10 преобразователей импеданса на опорных пьезорезонаторах, установленных в выдвигном рычаге скважинного прибора

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложен способ измерения пространственного распределения физических величин на основе параллельно соединённых пьезорезонансных датчиков, позволяющий уменьшить стоимость измерительного канала в системах управления производственными процессами за счёт использования общей двухпроводной соединительной линии. Способ и реализующие его устройства защищены патентами на изобретение.

2. Предложен метод и реализованы алгоритмы получения и обработки измерительной информации двухполосных многочастотных пьезорезонансных датчиков (МПРД), решившие проблему неустойчивости многочастотных колебаний и позволившие довести максимальную длину соединительного кабеля до 100 м в условиях большой ёмкости кабеля. Предложенный метод включает возбуждение колебаний одновременно на всех рабочих резонансах МПРД с помощью широкополосного частотно-модулированного сигнала и съём измерительного сигнала в режиме свободных колебаний.

3. Предложены и исследованы методы оценивания параметров многочастотного сигнала на основе обработки БПФ, отличающиеся высокой вычислительной эффективностью и дающие несмещённую оценку частоты и коэффициента затухания при условии компенсации боковых лепестков.

4. Получены аналитические выражения для определения нижних границ Крамера-Рао дисперсии оценок комплексной частоты и амплитуды, позволяющие упростить инженерные расчёты погрешности. Получены новые выражения для предела и порога разрешения. Рассмотрено влияние различных факторов на погрешность измерения. Нестабильность МПРД температуры составляет $\pm 0.1^\circ\text{C}$ за 10 лет работы без промежуточных калибровок.

5. Получены новые экспериментальные данные о свойствах камертонных пьезорезонаторов и методов оценивания параметров сигнала, позволяющие выработать рекомендации по их использованию в МПРД.

6. Разработаны и реализованы схемы включения МПРД в измерительную цепь, схемы вторичной измерительной аппаратуры. Разработанные устройства на основе МПРД использованы в университете г. Пуатье, Франция для измерения поля температуры водородного топливного элемента, в ОАО «Казанский вертолётный завод» (Казань) для измерения поля температуры в технологическом процессе изготовления лопастей вертолёт, в ООО «ТНГ-Групп» (Бугульма) для идентификации фаз флюидов в горизонтальных нефтяных скважинах и измерения температурного поля ствола скважины. Указанные МПРД характеризуются следующими параметрами: число проводов соединительного кабеля – 2, длина соединительного кабеля – до 100 м, число точек измерения (число используемых резонансов МПРД) – до 100.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Публикации в журналах ВАК

1. *Партс Я.А.* Многочастотные пьезорезонансные датчики: принцип действия, способы построения, решаемые задачи // *Нелинейный мир*, №5, т.7. – М.: Радиотехника, 2009. – с.92-96.

2. *Партс Я.А., Евдокимов Ю.К.* Нижняя граница погрешности оценки параметров многочастотного затухающего сигнала // *Нелинейный мир*, №9, т.7. – М.: Радиотехника, 2009. – с.718-723.

3. *Евдокимов Ю.К., Пармс Я.А.* Моделирование многоканального корреляционного расходомера на основе квазираспределённых датчиков // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, №3, 2001. – с.62-67.

Патенты

4. *Евдокимов Ю.К., Сагдиев Р.К., Байтуллин А.Ф., Пармс Я.А., Плещач Н.В., Бородулин В.А.* Способ измерения пространственного распределения температуры (варианты) и устройство для его осуществления. Патент №2194956 (РФ). Бюл. №35, 2002. (Патентообладатель – ОАО «Завод электроники и механики», г. Чебоксары)

5. *Евдокимов Ю.К., Кутин Е.М., Нетфуллов Ф.Х., Михеев В.Г., Сагдиев Р.К., Байтуллин А.Ф., Пармс Я.А.* Способ измерения пространственного распределения температуры и устройство для его осуществления. Патент №2206878 (РФ). Бюл. №17, 2003. (Патентообладатель – ОАО «Казанский вертолётный завод» (Казань), г. Казань)

6. *Евдокимов Ю.К., Пармс Я.А., Артамонов А.Т., Газизуллин К.М., Петров В.Н., Медведев И.П.* Способ теплового измерения уровней раздела сред. Патент №2213330 (РФ). Бюл. №27, 2003.

Статьи

7. *Пармс Я.А.* Методы определения частот спектральных составляющих полигармонического сигнала по его дискретному спектру // Электронное приборостроение, №3 (24). – Казань: Изд-во КГТУ, 2002. – с.41-59.

8. *Пармс Я.А.* Исследование аномальных ошибок оценки частоты затухающих синусоид в шуме // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments: сборник трудов. Международная научно-практическая конференция. – М.: Изд-во РУДН, 2003. – с.134-137.

9. *Евдокимов Ю.К., Пармс Я.А.* Квазираспределённые пьезорезонансные датчики в промышленных системах измерения температуры // Мир измерений №3 (109) – М.: Стандарты и качество, 2010. – с.13-20.

Материалы конференций

10. *Евдокимов Ю.К., Сагдиев Р.К., Пармс Я.А., Кутин Е.М., Михеев В.Г.* Система измерения поля температуры на квазираспределённых пьезорезонансных датчиках в составе АСУТП изготовления лопастей вертолётной // Авиакосмические технологии и оборудование: Материалы Международной научно-практической конференции. – Казань: Изд-во КГТУ, 2006. – с.222-223.

11. *Евдокимов Ю.К., Пармс Я.А., Сагдиев Р.К., Кутин Е.М., Михеев В.Г.* Особенности проектирования системы многоточечных измерений температуры на основе кварцевых резонаторов // Авиакосмические технологии и оборудование: Материалы Международной научно-практической конференции. – Казань: Изд-во КГТУ, 2006. – с.224-225.

12. *Евдокимов Ю.К., Сагдиев Р.К., Пармс Я.А.* Многоканальная телеметрическая система идентификации фаз флюидов в горизонтальных нефтяных скважинах // Информационные технологии в науке, образовании и производстве: Материалы Всероссийской научной конференции. – Казань: Изд-во КГТУ, 2007. – с.390-391.

13. *Евдокимов Ю.К., Пармс Я.А., Сагдиев Р.К.* Использование кварцевых пьезорезонансных датчиков для многоточечных измерений физических полей // Информационные технологии в науке, образовании и производстве: Материалы Всероссийской научной конференции. – Казань: Изд-во КГТУ, 2007.– с.392-394.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ.л. 1,0. Усл.печ.л. 0,93. Уч.-изд.л. 0,97.

Тираж 100. Заказ О150.

Типография Казанского государственного
технического университета
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

10²